



На правах рукописи

Мосеев Алексей Леонидович



## **УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭХОКОМПЕНСАТОРОВ В ТЕЛЕФОННЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05 12 13  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре динамики электронных систем  
Ярославского государственного университета им П Г Демидова

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор Брюханов Юрий Александрович

Официальные оппоненты  
доктор технических наук, профессор Витязев Владимир Викторович  
кандидат технических наук, доцент Левин Евгений Калманович

Ведущая организация ОАО «Ярославский радиозавод»

Защита диссертации состоится 30 мая 2007г в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212 025 04 при Владимирском государственном университете, по адресу г Владимир, ул Горького, 87, корпус 1 ауд 211

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 28 апреля 2007 г

Ученый секретарь диссертационного  
совета, д т н , профессор



А Г Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

По историческим и экономическим причинам абонентские линии телефонной сети общего пользования являются двухпроводными. Такое соединение приемлемо для небольших расстояний, когда ослабление сигнала невелико. Однако для передачи сигнала на значительные расстояния необходимо разделение передающей и принимающей частей цепи, что приводит к необходимости использования четырехпроводных линий.

Для стыковки четырехпроводных и двухпроводных цепей применяют дифференциальные системы, характеристики которых не идеальны. В результате сигнал, передаваемый по исходящей части четырехпроводной цепи, возвращается к своему источнику в виде эхосигнала. Другими источниками эха могут служить абонентские устройства, станционное оборудование, повреждения канала передачи. Эффект эха проявляется сильнее с увеличением длительности задержки эхосигнала в эхотракте. Этому способствуют различные системы преобразования, кодирования сигнала, оборудование развивающейся в настоящее время IP-телефонии.

Для снижения негативного влияния электрического эха применяются специальные устройства – эхоградители и эхокомпенсаторы. При использовании эхоградителей встречаются определенные трудности. Наличие в каналах шумов не дает возможности создать эхоградители с высокой чувствительностью. При включении эхоградителей ухудшается качество связи из-за, так называемого, эффекта клиппирования (пропадание части начальных и конечных слогов слов). Подобных проблем позволяют избежать более «интеллектуальные» устройства – эхокомпенсаторы.

Основная функция эхокомпенсатора заключается в формировании оценки эхосигнала и вычитании ее из просочившегося эхосигнала. Построение эхокомпенсаторов ведется с применением теории адаптивной обработки сигналов, теории временных рядов, теории статистики. При создании эхокомпенсаторов делается предположение о том, что телефонный канал обладает линейными характеристиками, однако в последнее время активно ведутся исследования вклада нелинейных составляющих эхотракта и их влияния на качество передаваемой речи.

В основе работы эхокомпенсаторов лежат различные адаптивные алгоритмы, которые на основании информации о величине ошибки и отсчетах сигнала дальнего абонента соответствующим образом подстраивают коэффициенты адаптивного фильтра (АФ), основанного на цифровом фильтре с конечной импульсной характеристикой (КИХ). Оценка эхосигнала получается путем свертки коэффициентов КИХ-фильтра и сигнала дальнего абонента.

К основным свойствам эхокомпенсатора можно отнести скорость сходимости адаптивного алгоритма и уровень остаточного эха. Однако существует еще один фактор, определяющий использование адаптивных алгоритмов – потребление вычислительных ресурсов или вычислительная нагрузка. На практике этот фактор часто делает невозможной или нерентабельной реализацию сложных алгоритмов ввиду резкого возрастания стоимости оного решения или невозможности работы алгоритма в реальном времени. Кроме того, для аких систем связи как IP-телефония, спутниковая связь остро стоит проблема увеличения длительности импульсной характеристики (ИХ) канала при передаче сигнала. Это ведет к увеличению числа весовых коэффициентов адаптивного фильтра, применяемого в эхокомпенсаторе и, следовательно, к повышению вычислительной нагрузки.

Задача снижения вычислительной нагрузки существующих алгоритмов перестройки весовых коэффициентов адаптивного фильтра является актуальной, несмотря на постоянное увеличение мощности производимых сигнальных процессоров. Анализ наиболее широко применяемых в настоящее время алгоритмов эхокомпенсации показывает, что они не

эффективно используют вычислительные ресурсы в задаче эхокомпенсации. Модернизация исходных алгоритмов с целью снижения вычислительной нагрузки дает положительный результат. Кроме того, с развитием систем связи требования к скорости и качеству обработки информации процессорами цифровой обработки сигналов становятся все более жесткими. В конечном итоге, создание новых алгоритмов позволит улучшить качество предоставляемых абонентам услуг.

**Цель работы** состоит в разработке адаптивных алгоритмов для удаления эхосигналов с большой величиной задержки в телефонных каналах.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- 1 Проводится анализ ранее предложенных методов снижения вычислительной нагрузки адаптивных алгоритмов в задаче эхокомпенсации. Оцениваются результаты тестирования существующих адаптивных алгоритмов согласно рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) G 165.
- 2 Разрабатывается процедура снижения количества операций в адаптивном алгоритме, основанная на разбиении набора весовых коэффициентов адаптивного фильтра на блоки с дальнейшим анализом импульсной характеристики эхотракта согласно новым критериям.
- 3 На основе разработанной процедуры выполняется модификация адаптивных алгоритмов – Нормализованного метода наименьших квадратов (НМНК) и Рекурсивного метода наименьших квадратов (РНК), и с использованием полученных адаптивных алгоритмов разрабатывается эхокомпенсатор.
- 4 Определяется влияние параметров алгоритмов на работу эхокомпенсатора, исследуются результаты работы эхокомпенсатора на основных тестах рекомендации МСЭ-Т G 165. Выполняется сравнение работы новых алгоритмов на тестовых и речевых сигналах при появлении дополнительных искажений в импульсной характеристике эхотракта. Исследуется работа многоканального эхокомпенсатора, построенного на основе новых алгоритмов.

**Предметом исследования** являются характеристики разработанных адаптивных алгоритмов в задаче эхокомпенсации.

**Методы исследования** основаны на положениях теории сигналов и цепей дискретного времени, теории адаптивных систем, методах математической статистики и линейной алгебры. Моделирование и анализ полученных алгоритмов проводились на ЭВМ.

#### **Научная новизна работы:**

- 1 Разработана процедура снижения вычислительной нагрузки адаптивных алгоритмов, применяемых в эхокомпенсации, основанная на новых критериях блочной оценки весовых коэффициентов адаптивного фильтра.
- 2 Разработаны адаптивные алгоритмы, основанные на новой процедуре, позволяющие повысить эффективность работы эхокомпенсатора.
- 3 Произведено тестирование работы эхокомпенсатора на основе полученных алгоритмов, по результатам которого определены значения параметров адаптивных алгоритмов, при которых эхокомпенсатор может быть использован при построении телефонной сети.
- 4 На основе разработанных алгоритмов построен многоканальный эхокомпенсатор, обладающий большей эффективностью за счет снижения вычислительной нагрузки адаптивного алгоритма.

#### **Внедрение:**

- 1 Результаты научной работы автора использованы в разработках Верхневолжского филиала ОАО «Центртелеком» (г. Ярославль).

- 2 Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре динамики электронных систем физического факультета Ярославского государственного университета имени П.Г. Демидова (специальность 200900 - Сети связи и системы коммутации), а также внедрены в научно-исследовательские работы при выполнении исследований в рамках грантов РФФИ № 02-02-17500 «Нелинейная динамика цифровых электронных систем» (2002-2004 гг.), № 06-02-17195 «Нелинейные явления в динамических системах дискретного времени» (2006-2008 гг.) и № 06-08-00782 «Развитие теории цифровой обработки сигналов и изображений в технических системах» (2006-2008 гг.), при выполнении исследований в рамках задания Федерального агентства по образованию РФ на проведение научных исследований по тематическому плану научно-исследовательских работ (номер государственной регистрации НИР 01200201894) «Исследование динамики нелинейных электронных устройств и систем дискретного времени»

#### **На защиту выносятся:**

- 1 Новая процедура снижения вычислительной сложности адаптивных алгоритмов на основе разработанных критериев оценки блоков весовых коэффициентов
- 2 Разработанные адаптивные алгоритмы подстройки весовых коэффициентов КИХ-фильтра во временной области, построенные с применением новой процедуры
- 3 Результаты тестирования эхокомпенсатора на основе полученных адаптивных алгоритмов
- 4 Результаты применения разработанных адаптивных алгоритмов при построении многоканального эхокомпенсатора

#### **Практическая ценность работы:**

- 1 Разработана процедура снижения вычислительной нагрузки адаптивных алгоритмов эхокомпенсации, которая не требует внесения значительных изменений в уже существующий код, что позволяет повысить эффективность алгоритмов эхокомпенсации без существенных затрат
- 2 Разработаны адаптивные алгоритмы, основанные на алгоритме НМНК, которые отличаются невысокой вычислительной сложностью и простотой реализации, а алгоритмы, основанные на алгоритме РНК, позволяют значительно снизить вычислительную нагрузку за счет сокращения матричных преобразований, специфичных для данного алгоритма
- 3 Применение полученных адаптивных алгоритмов в составе эхокомпенсатора позволяет обрабатывать эхотракты с задержкой эхосигнала более 250 мс
- 4 Применение новых алгоритмов в составе многоканального эхокомпенсатора позволяет сократить количество вычислений на 30% относительно классических алгоритмов

#### **Апробация результатов работы:**

Основные результаты диссертационной работы обсуждались на 7-й и 8-й Международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2005, 2006), LX, LXI Научной сессии, посвященной Дню радио (Москва, 2005, 2006), V Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2002), 2-й Международной конференции «Цепи и системы связи» IEEE (Москва, 2004), Международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии» (Москва, 2005), Научно-техническом семинаре «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания» (Самара, 2005), 12-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов ЭИ, Москва, 2006), а также на ярославских областных конференциях молодых ученых и аспирантов

По теме диссертации опубликовано 24 научных работы, включая 2 статьи в изданиях, входящих в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, и 22 доклада на конференциях

#### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и списка литературы, включающего 117 наименований. Общий объем диссертации составляет 151 страницу машинописного текста. Работа содержит 28 рисунков и 4 приложения

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность диссертационной работы

В первом разделе (ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ БЛОЧНЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧЕ ЭХОКОМПЕНСАЦИИ) приводятся результаты анализа существующих блочных методов снижения вычислительной нагрузки адаптивных алгоритмов применительно к задаче эхокомпенсации. Рассматриваются следующие адаптивные алгоритмы, в которых применяются методы понижения вычислительной нагрузки, основанные на блочном подходе

- алгоритм НМНК с последовательной перестройкой блоков весовых коэффициентов (НМНК с ППБ),
- алгоритм НМНК с выборкой весовых коэффициентов (НМНК с ВВК),
- Блочный алгоритм МНК (БМНК),
- Быстрый блочный алгоритм МНК (ББМНК)

Анализ методов снижения вычислительной сложности, применяемых в рассматриваемых алгоритмах позволяет сделать следующие выводы

- алгоритм НМНК с последовательной перестройкой блоков обладает недостатком, заключающимся в том, что скорость сходимости алгоритма к оптимальным значениям весовых коэффициентов уменьшается пропорционально уменьшению вычислительной нагрузки. Эта особенность накладывает дополнительные ограничения на применение данного алгоритма в эхокомпенсации, где скорость сходимости строго регламентирована,
- к недостаткам алгоритма НМНК с выборкой весовых коэффициентов адаптивного фильтра следует отнести дополнительное потребление вычислительных ресурсов на операцию сортировки векторов входного сигнала и весовых коэффициентов,
- недостатком блочного алгоритма МНК является то, что алгоритм выбирает строго определенное количество отсчетов входного сигнала на каждой итерации. При этом количество весовых коэффициентов в блоке должно равняться количеству выбранных отсчетов. Также в алгоритме остается неопределенность с выбором значения параметра сходимости  $\mu$ ,
- в быстром блочном алгоритме МНК, в дополнение к недостаткам алгоритма БМНК, преобразования выполняются в частотной области с использованием БПФ, что требует дополнительных вычислительных ресурсов

Исследуется поведение существующих алгоритмов в составе эхокомпенсатора на основных тестах рекомендации G 165 Международного союза электросвязи. Для исследования использована модель эхокомпенсатора, структурная схема которой приведена на рис. 1



Для НМНК с ВВК количество перестраиваемых весовых коэффициентов  $M = 160$ , для НМНК ППБ количество блоков коэффициентов  $B_c = 4$ . Размер блока для БМНК и ББМНК равен 16

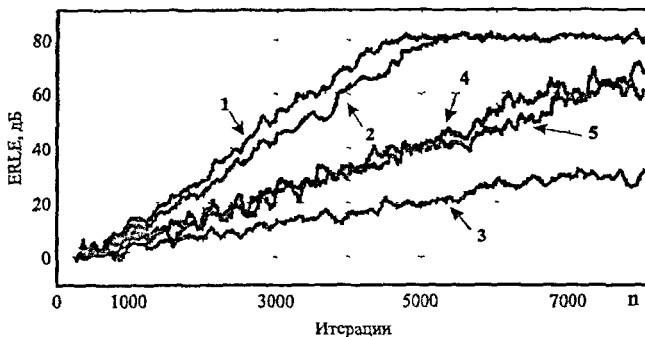


Рис 2 Поведение алгоритмов в тесте № 2

1 – НМНК, 2 – НМНК с ВВК, 3 – НМНК с ППБ, 4 – БМНК, 5 – ББМНК

Из рис 2 видно, что скорость сходимости рассматриваемых алгоритмов меньше, чем у классического алгоритма НМНК. Блочный алгоритм МНК и быстрый блочный алгоритм МНК при данных значениях параметров ведут себя почти одинаково. Дополнительно для каждого алгоритма определена максимальная длительность ИХ адаптивного фильтра, при которой выполняются требования теста. Для алгоритма НМНК  $L_{\max} = 512$ , для алгоритма НМНК с ППБ  $L_{\max} = 256$ , для алгоритма НМНК с ВВК  $L_{\max} = 512$ , для алгоритма БМНК  $L_{\max} = 270$ , для алгоритма ББМНК  $L_{\max} = 512$ .

В тесте № 3б исследуется поведение эхокомпенсатора в режиме встречного разговора, когда оба абонента говорят одновременно. Для того, чтобы уменьшить отрицательный эффект от встречного разговора применяют устройства детектирования встречного разговора (ДВР). Тест позволяет определить максимальное значение задержки  $\delta t$  срабатывания детектора, которую допускает алгоритм при заданном параметре сходимости  $\alpha$ . Чем больше значение  $\delta t$  для используемого алгоритма эхокомпенсации, тем менее строгие требования предъявляются к алгоритму детектирования встречного разговора.

Значения параметра  $\alpha$  выбирались согласно результатам теста № 2. При уровне сигнала дальнего абонента  $x(n) = [-30 \text{ дБм}0 \quad -10 \text{ дБм}0]$  уровень сигнала ближнего абонента  $v(n) \geq x(n)$ ,  $L = 256$ . По результатам теста можно заключить, что тестируемые алгоритмы в значительной степени уступают алгоритму НМНК в режиме встречного разговора, и, следовательно, требуют высокой точности работы ДВР. Алгоритм НМНК-ВВК оказался наиболее чувствительным к эффекту одновременного разговора абонентов.

Тест № 5 рекомендации G 165 позволяет определить, как поведет себя эхокомпенсатор в случае резкого исчезновения эхосигнала. В такой ситуации эхокомпенсатор не должен являться источником дополнительных искажений в канале. В момент, когда коэффициенты адаптивного фильтра достигали оптимальных (согласно критерию среднеквадратичной ошибки) значений, эхотракт разрывался. Спустя 500 мс измерялся уровень остаточного эха, который согласно требованиям теста не должен превышать  $-37 \text{ дБм}0$ . В тесте  $L = 256$ . По результатам можно сделать вывод, что требованиям теста в полной мере удовлетворяют алгоритм НМНК и алгоритм с выборочной подстройкой весовых коэффициентов адаптивного фильтра. Алгоритм с блочной подстройкой требованиям теста удовлетворяет лишь в случае, когда уровень входного



сигнала составляет  $-30$  дБМО и ниже, что говорит о невозможности его применения в составе эхокомпенсатора

Во втором разделе (ПОСТРОЕНИЕ НОВЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ С ПОНИЖЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ) предлагается новая процедура снижения вычислительной нагрузки существующих адаптивных алгоритмов. Суть процедуры заключается в следующем. Импульсная характеристика эхотракта имеет типичную особенность, которая заключается в том, что основная энергия ИХ сосредоточена на небольшом участке с отличными от нуля отсчетами длительностью 4-8 мс, а остальная (большая) ее часть близка к нулю и фактически представляет собой отсчеты, приходящиеся на линию задержки (рис 3). Адаптивный алгоритм в процессе работы осуществляет перестройку весовых коэффициентов адаптивного фильтра таким образом, чтобы импульсная характеристика фильтра как можно точнее (в среднеквадратичном смысле) моделировала ИХ эхотракта



Рис 3 Вид ИХ эхотракта с учетом задержки

Классические адаптивные алгоритмы НМНК и РНК не учитывают указанной особенности ИХ эхотракта. На каждой итерации своей работы они подстраивают все весовые коэффициенты адаптивного фильтра, что приводит к неэффективному использованию вычислительных ресурсов. Очевидно, что при обработке эхотракта с ИХ, подобной той, что приведена на рис 3, большая часть операций в алгоритме будет осуществляться с отсчетами, характерными для линии задержки.

Построение эхокомпенсатора на основе фильтра с конечной импульсной характеристикой имеет еще одну важную особенность. Для корректной оценки эхосигнала адаптивный фильтр должен иметь длительность ИХ равную либо большую длительности ИХ эхотракта. Это условие накладывает дополнительные ограничения на максимальную длительность обрабатываемых эхотрактов. В случае применения алгоритма НМНК увеличение длительности ИХ АФ приводит к уменьшению скорости сходимости адаптивного алгоритма.

Исходя из указанного, определим основные требования к новым алгоритмам адаптации

- учет особенностей ИХ эхотракта,
- эффективная работа в условиях длительных эхотрактов,
- соответствие рекомендации МСЭ-T G 165,
- простота реализации

#### *Создание процедуры понижения вычислительной нагрузки*

Чтобы понизить требования алгоритмов НМНК и РНК к вычислительным ресурсам, но при этом сохранить необходимые характеристики (скорость сходимости, уровень подавления эхосигнала), предлагается исключить из обработки те весовые коэффициенты адаптивного фильтра, которые соответствуют нулевым отсчетам ИХ эхотракта и не влияют на суммарное значение сигнала, и тем самым уменьшить вычислительную нагрузку. Для этого выполним следующие действия: весь набор коэффициентов адаптивного фильтра делим на блоки, размер

которых кратен 2, т.к. число коэффициентов фильтра, как правило, выбирается кратным 2. На каждой итерации производится оценка, на основании которой отключаются определенные блоки весовых коэффициентов адаптивного фильтра. Рассмотрим критерии, согласно которым будут исключаться из обработки отдельные блоки.

*Критерий, основанный на анализе значений весовых коэффициентов в блоках (АЗКБ)*

В процессе работы сравнивается значение суммы модулей весовых коэффициентов каждого блока с максимальной из сумм блоков, умноженной на некоторый пороговый коэффициент. Выражение для оценки имеет вид

$$\sum_{i=(j-1)l}^{jl} |\hat{h}_i(n)| < p \max \left\{ \sum_{i=1}^l |\hat{h}_i(n)|, \sum_{i=l+1}^{2l} |\hat{h}_i(n)|, \dots, \sum_{i=(m-1)l+1}^{ml} |\hat{h}_i(n)| \right\}, \quad (2)$$

$$j = 1, 2, \dots, m,$$

где  $j$  – номер блока,  $l$  – число весовых коэффициентов в блоке,  $m$  – общее число блоков,  $p$  – порог отключения блоков, который задается на этапе инициализации алгоритма. Введем обозначения

$$B_{\max}(n) = \max \left\{ \sum_{i=1}^l |\hat{h}_i(n)|, \sum_{i=l+1}^{2l} |\hat{h}_i(n)|, \dots, \sum_{i=(m-1)l+1}^{ml} |\hat{h}_i(n)| \right\},$$

$$B_j(n) = \sum_{i=(j-1)l}^{jl} |\hat{h}_i(n)|, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

С учетом введенных обозначений (2) переписывается в виде

$$\frac{B_j}{B_{\max}} < p, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Неравенство (3) описывает условие, при выполнении которого происходит отключение  $j$ -го блока весовых коэффициентов.

*Критерий, основанный на анализе значений сигнала от блоков весовых коэффициентов (АЗСБ)*

В своей работе данный критерий также учитывает указанные особенности ИХ экотракта. Набор весовых коэффициентов адаптивного фильтра делится на блоки. Далее производится оценка вклада каждого блока в суммарную оценку экосигнала на выходе адаптивного фильтра. На основании полученных данных отключаются блоки, вклад которых в суммарное значение сигнала незначительный. Величина сигнала от каждого блока находится путем свертки соответствующих входных отсчетов сигнала и коэффициентов соответствующего блока адаптивного фильтра. Значение сигнала для каждого блока весовых коэффициентов определяется выражением

$$\hat{y}_j(n) = \sum_{i=1}^{B_l} x(n - (j-1)B_l - i) \hat{h}_i(n)_{(j-1)B_l+i} \quad (4)$$

Тогда оценка экосигнала адаптивным фильтром может быть записана как сумма оценок экосигнала всех блоков весовых коэффициентов

$$\hat{y}(n) = \sum_{j=1}^{B_r} \hat{y}_j(n) = \sum_{i=1}^L x(n-i) \hat{h}_i(n) \quad (5)$$

Оценку значений сигнала отдельных блоков весовых коэффициентов будем производить согласно выражению

$$\frac{y_j(n)}{y_{\max}(n)} < p, \quad j \in [1, m], \quad (6)$$

где

$$y_{\max}(n) = \max \{y_j(n)\}$$

Константа  $p$  в обоих критериях задает порог для отключения незначительных блоков коэффициентов адаптивного фильтра и должна быть достаточно малой, чтобы отключать действительно незначительные блоки, выключение которых не приведет к уменьшению ослабления эха (в случае, когда отключаемые блоки не являются строго нулевыми)

Таким образом, процедуру понижения вычислительной сложности можно описать следующим образом

- Набор весовых коэффициентов АФ делится на блоки
- Выбирается один из критериев оценки значения блоков (3) либо (6)
- На каждой итерации алгоритма производится проверка выполнения неравенства (3) либо (6) для каждого блока
- Из обработки исключаются весовые коэффициенты, для которых выполнено соответствующее условие
- Если происходит ухудшение подавления экосигнала, исключенные блоки вновь включаются в обработку

*Модернизация алгоритма НМНК с применением процедуры понижения вычислительной нагрузки*

Применим полученную процедуру понижения вычислительной сложности к алгоритму НМНК. Схему работы нового алгоритма можно определить следующим образом. До момента включения оценки значений блоков весовых коэффициентов адаптивного фильтра функционирование алгоритма определяется выражениями для обычного алгоритма НМНК. На каждой итерации оценивается уровень остаточного эха на выходе эхокомпенсатора согласно выражению (4). При достижении заданного порога уровня остаточного эха (значение порога задается на этапе инициализации алгоритма) начинает работать оценка значений блоков, определяемая выражениями (3) либо (6) в зависимости от применяемого критерия. Согласно этой оценке формируется массив, содержащий информацию об отключаемых блоках в виде

$$\tilde{B}_j(n) = \begin{cases} 1, & \text{условие выполняется,} \\ 0, & \text{условие не выполняется,} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

Тогда выражение для подстройки весовых коэффициентов адаптивного фильтра запишем как

$$\hat{h}_i(n) = \begin{cases} \hat{h}_i(n-1) + \mu(n) \cdot x(n-i) \cdot e(n), & \tilde{B}_j(n) = 1, \\ \hat{h}_i(n-1), & \tilde{B}_j(n) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

*Модернизация алгоритма РНК с применением процедуры понижения вычислительной нагрузки*

Разработанная процедура применима также и к алгоритму РНК. Новый алгоритм на начальном этапе также функционировал согласно выражениям для обычного алгоритма РНК. Выражение (1) определяет порог включения оценки значений блоков весовых коэффициентов (3) либо (6). На основании данных массива (7) выполняется подстройка весовых коэффициентов адаптивного фильтра.

$$\hat{h}_i(n) = \begin{cases} \hat{h}_i(n-1) + k_i(n) \cdot e(n), & \tilde{B}_j(n) = 1, \\ \hat{h}_i(n-1), & \tilde{B}_j(n) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

В выражении (9)

$$k_i(n) = \frac{\lambda^{-1} W_{s,t}(n-1) x_s(n)}{1 + \lambda^{-1} \cdot x_s(n) W_{s,t}(n-1) x_s(n)}, \quad (10)$$

$s, t$  принадлежат активному блоку

$$W_{s,t}(n) = \lambda^{-1} W_{s,t}(n-1) - \lambda^{-1} k_s(n) x_s(n) W_{s,t}(n-1), \quad (11)$$

$s, t$  принадлежат активному блоку

$$j \in [1, m],$$

$$i \in [(j-1)l, (j-1)l + l]$$

Применение процедуры понижения вычислительной сложности позволяет сократить количество матричных вычислений, значительно повышающих вычислительную нагрузку алгоритма РНК. При этом, как видно из (11), квадратная ковариационная матрица входного сигнала  $W$  вычисляется не полностью. Пересчитывается лишь та ее часть, которая соответствует ненулевым блокам весовых коэффициентов. Это же справедливо и для вектора  $k$  в (10).

Применяя разработанную процедуру понижения вычислительной сложности в данном случае, получаем, что свертке подлежат не все весовые коэффициенты фильтра, а только те, для которых  $\tilde{B}_j(n) = 1$ .

$$\hat{y}(n) = \begin{cases} \sum_{i=(j-1)l}^{(j-1)l+l} x(n-i) \hat{h}_i(n), & \tilde{B}_j(n) = 1 \\ 0, & \tilde{B}_j(n) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$j \in [1, m]$$

Из (8)-(12) следует, что в вычислениях участвует не весь набор весовых коэффициентов адаптивного фильтра, а лишь те из них, для которых выполнено условие (3) либо (6).

- Функционирование предлагаемых алгоритмов можно охарактеризовать двумя режимами
- начальный режим работы, который описывается выражениями для обычного НМНК или РНК,
  - режим установившихся значений, когда работает оценка блоков весовых коэффициентов, определяемая выражениями (3), (6). Этот режим характеризуется

отключением всех нулевых блоков коэффициентов, при этом в работе остается лишь активная часть (часть IX с ненулевыми отсчетами) импульсной характеристики эхотракта длительностью  $L_A$

Если на какой-либо итерации качество подавления эхосигнала начинает ухудшаться, что означает уменьшение величины  $ERLE$  (1), отключенные блоки весовых коэффициентов фильтра вновь включаются в работу

*Создание комбинированного адаптивного алгоритма с применением процедуры понижения вычислительной нагрузки*

Как было отмечено, адаптивный алгоритм на основе новых критериев работает в двух режимах начальном и режиме установившихся значений. Начальный режим характеризуется максимальным потреблением вычислительных ресурсов, так как в этот момент идет активная подстройка всего набора весовых коэффициентов адаптивного фильтра. В этом режиме основная задача алгоритма – быстро достичь достаточного уровня подавления эхосигнала и определить, какие блоки весовых коэффициентов будут участвовать в дальнейших вычислениях, а какие можно отключить. Следовательно, на начальном этапе выгодно использовать алгоритм РНК, обладающего высокой скоростью сходимости, не зависящей от длительности IX адаптивного фильтра. Вычислительная сложность алгоритма в этот момент определяется как  $O(L^2)$ . Режим установившихся значений, напротив, отличается минимальными вычислениями, так как часть блоков весовых коэффициентов отключена в начальном режиме. В момент перехода в этот режим уже достигнуто необходимое подавление эхосигнала, поэтому его необходимо просто удерживать, т.е. нет необходимости в большой скорости сходимости. На этом этапе будет работать модифицированный алгоритм НМНК, более простой и устойчивый к возможным искажениям входного сигнала. Тогда вычислительная сложность алгоритма определяется как  $O(L_A)$ , где  $L_A \leq L$  – количество весовых коэффициентов адаптивного фильтра, оставшихся в работе после перехода из начального режима.

В качестве пороговой определим величину  $ERLE$ , при которой произойдет переключение с алгоритма РНК на алгоритм НМНК. Необходимую величину подавления эхосигнала задают требования теста №1 рекомендации G 165 МСЭ-Т. Следовательно, требование теста определяет минимальное значение для величины порога при заданном уровне входного сигнала.

Необходимо подчеркнуть еще одно положительное качество полученного адаптивного алгоритма. Ситуация встречного разговора, когда говорят оба абонента одновременно, отрицательно сказывается на работе адаптивного алгоритма на основе алгоритма РНК в большей степени, чем для алгоритма на основе НМНК. Значения весовых коэффициентов после отклонения, вызванного встречным разговором, медленно возвращаются к своим оптимальным значениям, что приводит к ухудшению подавления эхосигнала. Так как встречный разговор возникает, как правило, после того, как коэффициенты адаптивного фильтра достигли своих оптимальных значений, а значит, достигнуто необходимое подавление эхосигнала, и работает модифицированный алгоритм НМНК, то отклонение весовых коэффициентов от оптимальных будет меньше, чем в случае алгоритма РНК.

*Оценка вычислительной нагрузки алгоритма НМНК на основе новых критериев АЗКБ и АЗСБ*

В табл. 1 приведены результаты оценки количества арифметических операций для алгоритма НМНК и новых алгоритмов.

Таблица 1 Оценка количества операций для алгоритма НМНК и новых алгоритмов

Алгоритм	Сложеный	Умноженный	Сравнений
НМНК	$2L$	$2L$	0
Новый алгоритм (АЗКБ, АЗСБ) (начальный режим)	$2L$	$2L$	$3\frac{L}{l}$
Новый алгоритм (АЗКБ, АЗСБ) (установившийся режим)	$3L_A$	$2L_A$	$3\frac{L_A}{l}$

Оценка вычислительной нагрузки алгоритма РНК на основе новых критериев АЗКБ и АЗСБ

Исследование поведения алгоритма показало, что использование предложенных методов понижения вычислительной нагрузки наряду с сокращением числа активных коэффициентов адаптивного фильтра позволяет значительно уменьшить рабочую размерность матриц (т.е. количество матричных элементов, участвующих в вычислениях на текущей итерации алгоритма)

Таблица 2 Оценка количества операций для алгоритма РНК и новых алгоритмов

Алгоритм	Сложеный	Умноженный	Сравнений
РНК	$4L^2 + 4L$	$4L^2 + 6L$	0
Новый алгоритм (АЗКБ, АЗСБ) (начальный режим)	$4L^2 + 4L$	$4L^2 + 6L$	$4\frac{L}{l}$
Новый алгоритм АЗКБ (установившийся режим)	$4L_A^2 + 4L_A$	$4L_A^2 + 6L_A$	$4\frac{L_A}{l}$
Новый алгоритм АЗСБ (установившийся режим)	$4L_A^2 + 4L_A + \frac{L_A}{l}$	$4L_A^2 + 6L_A$	$4\frac{L_A}{l}$

В третьем разделе (ПОСТРОЕНИЕ ЭХОКОМПЕНСАТОРА НА ОСНОВЕ НОВЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ) исследуется поведение эхокомпенсатора, построенного на новых адаптивных алгоритмах с применением разработанной процедуры снижения вычислительной нагрузки. Приводятся результаты тестирования эхокомпенсатора на соответствие требованиям рекомендации G 165 Международного союза электросвязи. Дается оценка влияния изменения параметров алгоритма на подавление эхосигнала эхокомпенсатором. Кроме того, приводятся результаты тестирования работы эхокомпенсатора на реальном речевом сигнале и исследуется влияние уменьшения разрядности операндов на работу новых алгоритмов. Также представлены результаты сравнения работы одно-, трех- и пятиканального эхокомпенсатора, построенного с применением процедуры понижения вычислительной нагрузки.

Исследование влияния значения порога  $p$  показало, что от величины этого параметра зависит насколько точно адаптивный алгоритм будет моделировать ИХ эхотракта на момент включения оценки блоков весовых коэффициентов адаптивного фильтра. Следовательно, чем меньше значение порога, тем позже начнет работать оценка блоков, тем дольше новый алгоритм будет работать в начальном режиме, т.е. как обычный алгоритм НМНК либо РНК. По

результатам моделирования можно определить оптимальный с точки зрения продолжительности работы алгоритмов в начальном режиме диапазон значений параметра  $p$

- для алгоритма НМНК-АЗКБ и РНК-АЗКБ  $p \in [0.05 \quad 0.3]$ ,
- для алгоритма НМНК-АЗСБ и РНК-АЗСБ  $p \in [0.00001 \quad 0.001]$

При выборе значения  $p$  из указанных диапазонов коэффициенты адаптивного фильтра наиболее точно описывают ИХ эхотракта. Выбор  $p$  вне диапазонов приводит к ухудшению рабочих характеристик алгоритма.

Результаты моделирования, полученные для случая, когда длительность  $L$  ИХ адаптивного фильтра значительно превышает длительность  $N$  ИХ фильтра, моделирующего эхотракт, показаны на рис 4 и рис 5. Из графиков видно, что новые алгоритмы в отличие от классических алгоритмов НМНК и РНК значительно быстрее достигают максимального уровня подавления эхосигнала при той же длительности ИХ адаптивного фильтра.

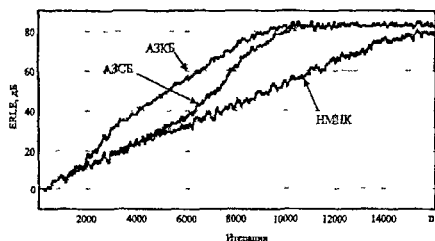


Рис 4 Подавление эхосигнала алгоритмом НМНК и новыми алгоритмами  
 $\alpha = 1, N = 256, L = 1024, l = 16$

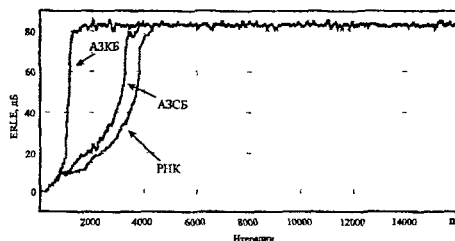


Рис 5 Подавление эхосигнала алгоритмом РНК и новыми алгоритмами  
 $\lambda = 0.99, N = 256, L = 1024, l = 16$

В обычных алгоритмах НМНК и РНК разница между  $L$  и  $N$  никак не компенсируется, и все весовые коэффициенты участвуют в подстройке.

Тестирование новых алгоритмов при наличии дополнительных ненулевых отсчетов в ИХ эхотракта показало, что если амплитуда искажений  $A$  в линии задержки достаточно мала, то выполняется условие

$$\frac{|A|}{\max\{\hat{H}\}} \leq p, \quad (13)$$

то они не влияют на отключение блоков весовых коэффициентов адаптивного фильтра.

#### Результаты тестов рекомендации МСЭ-TG 165

Рассмотрим результаты работы новых алгоритмов в основных тестах рекомендации G 165. В тесте № 1 для уровня входного сигнала  $x(n)$  из диапазона  $[-30\text{дБм} \quad -10\text{дБм}0]$  и  $l = 16$  значение  $p = 0.1$  для АЗКБ,  $p = 0.0001$  для АЗСБ. Число весовых коэффициентов адаптивного фильтра  $L = 256$ . Импульсная характеристика эхотракта имеет вид характеристики, изображенной на рис 3. Эхокомпенсатор, построенный как на основе обычного НМНК, так и на основе нового алгоритма, достигает требуемого уровня подавления эхосигнала, но в случае применения нового алгоритма наблюдается меньший уровень остаточного эхосигнала, что связано с отключением отдельных блоков весовых коэффициентов адаптивного фильтра и увеличением скорости сходимости алгоритма.

Новые алгоритмы, основанные на РНК, показывают аналогичные результаты. В данном случае длительность ИХ адаптивного фильтра выбиралась различной, так как скорость сходимости

алгоритма РНК не зависит от длительности ИХ. Для  $L = \{256, 512, 1024\}$  уровень остаточного эха составил  $-89$  дБм0. Комбинированный алгоритм также обеспечил высокое подавление эхосигнала. Результаты теста № 2 приведены в таблице 3.

Таблица 3 Результаты теста № 2 рекомендации МСЭ-T G 165

Уровень вх. сигнала (дБм0)	$\alpha$ для НМНК-АЗКБ	$\alpha$ для НМНК-АЗСБ	$\lambda$ для РНК-АЗКБ и РНК-АЗСБ
-10	0 20	0 20	0 98
-20	0 20	0 18	0 98
-30	0 20	0 15	0 98

Тест № 2 показал, что использование алгоритмов НМНК-АЗКБ и НМНК-АЗСБ позволяет обрабатывать экотракты длительностью ИХ до 1280 отсчетов, алгоритма РНК-АЗКБ – до 2880 отсчетов, а алгоритма РНК-АЗСБ – до 1024 отсчетов. Для комбинированного алгоритма получаем  $\lambda = 0.98$  при  $L = \{256, 512, 1024, 2880\}$ .

В тесте № 3b значения параметров  $\alpha$  и  $\lambda$  выбирались согласно результатам теста № 2. При уровне сигнала дальнего абонента  $x(n) = [-30 \text{ дБм0} \quad -10 \text{ дБм0}]$  и уровне сигнала ближнего абонента  $v(n) \geq x(n)$ , допустимые значения задержки, при которой выполняются требования G 165, приведены в табл. 4 и табл. 5.

Таблица 4 Результаты теста № 3b рекомендации G 165 для алгоритма НМНК-АЗКБ

Уровень входного сигнала	Результаты теста		
	L=256	L=512	L=1024
$U_{R_m} = -30 \text{ дБм0}, U_N = -10 \text{ дБм0}$	$\delta t = 13.75 \text{ мс}$	$\delta t = 10.00 \text{ мс}$	$\delta t = 8.13 \text{ мс}$
$U_{R_m} = -20 \text{ дБм0}, U_N = -10 \text{ дБм0}$	$\delta t = 12.50 \text{ мс}$	$\delta t = 10.00 \text{ мс}$	$\delta t = 8.13 \text{ мс}$
$U_{R_m} = -10 \text{ дБм0}, U_N = -5 \text{ дБм0}$	$\delta t = 56.25 \text{ мс}$	$\delta t = 43.75 \text{ мс}$	$\delta t = 42.50 \text{ мс}$

Таблица 5 Результаты теста № 3b рекомендации G 165 для алгоритма НМНК-АЗСБ

Уровень входного сигнала	Результаты теста		
	L=256	L=512	L=1024
$U_{R_m} = -30 \text{ дБм0}, U_N = -10 \text{ дБм0}$	$\delta t = 6.25 \text{ мс}$	$\delta t = 1.25 \text{ мс}$	$\delta t = 0.75 \text{ мс}$
$U_{R_m} = -20 \text{ дБм0}, U_N = -10 \text{ дБм0}$	$\delta t = 6.25 \text{ мс}$	$\delta t = 1.25 \text{ мс}$	$\delta t = 0.75 \text{ мс}$
$U_{R_m} = -10 \text{ дБм0}, U_N = -5 \text{ дБм0}$	$\delta t = 47.50 \text{ мс}$	$\delta t = 36.25 \text{ мс}$	$\delta t = 35.00 \text{ мс}$

Результаты теста № 3b для новых алгоритмов, основанных на РНК, следующие **РНК-АЗКБ**.

Для  $U_{R_m} = U_N = -30 \text{ дБм0}$  и  $L = \{256, 512, 1024, 2280\}$   $\delta t = 100 \text{ мс}$

Для  $U_{R_m} = U_N = -20 \text{ дБм0}$  и  $L = \{256, 512, 1024, 2280\}$   $\delta t = 62 \text{ мс}$

Для  $U_{R_m} = U_N = -10 \text{ дБм0}$  и  $L = \{256, 512, 1024, 2280\}$   $\delta t = 50 \text{ мс}$



### **РНК-АЗСБ**

Для  $U_{R_m} = U_N = -30$  дБм0 и  $L = \{256, 512, 1024\}$   $\delta t = 62,50$  мс

Для  $U_{R_m} = U_N = -20$  дБм0 и  $L = \{256, 512, 1024\}$   $\delta t = 56,25$  мс

Для  $U_{R_m} = U_N = -10$  дБм0 и  $L = \{256, 512, 1024\}$   $\delta t = 18,75$  мс

Для комбинированного алгоритма результаты теста совпадают с результатами, приведенными в табл 4 и табл 5

По результатам можно сделать вывод, что эхокомпенсатор, построенный на новых алгоритмах, будет удовлетворять требованиям рекомендации МСЭ-T G 165

Далее приведены результаты тестирования новых адаптивных алгоритмов на реальных речевых сигналах. Качество работы оценивается по двум критериям

- затраты процессорного времени на подстройку набора весовых коэффициентов адаптивного фильтра на каждой итерации,
- качество подавления эхосигнала эхокомпенсатором (оценивается на слух, что позволяет сделать заключение о том, как работа эхокомпенсатора воспринимается абонентом телефонной сети)

Ситуация встречного разговора не учитывается, т.е.  $v(n) = 0$ . Ослабление в эхотракте предполагается равным 6 дБ

### *Результаты теста для алгоритма НМНК-АЗКБ*

На рис 6 изображены затраты процессорного времени для подстройки набора весовых коэффициентов адаптивного фильтра на каждой итерации алгоритма. Параметры алгоритма задавались следующим образом:  $\alpha = 0,45$ ,  $L = 256$ ,  $p = 0,05$ , порог  $ERLE$  равен 30 дБ. При указанных параметрах эхокомпенсатор обеспечил подавление эхосигнала на 47 дБ относительно уровня  $y(n)$

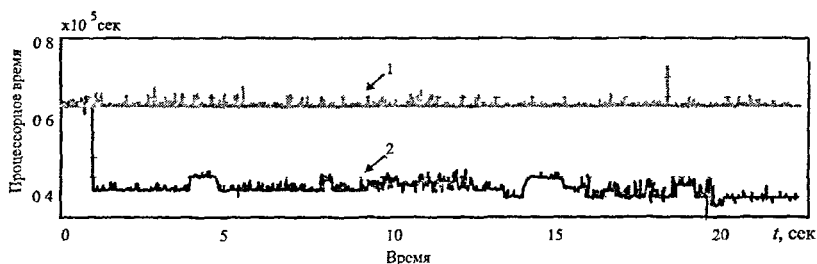


Рис 6 Процессорное время, затрачиваемое на подстройку весовых коэффициентов адаптивного фильтра 1 – алгоритм НМНК, 2 – алгоритм НМНК-АЗКБ

При восприятии «на слух» можно отметить следующее: отчетливо слышна речь дальнего абонента в течение 1,5 секунд, затем незначительно слышны только начальные слоги отдельных слов

### *Результаты теста для алгоритма НМНК-АЗСБ*

На рис 7 изображены затраты процессорного времени для подстройки набора весовых коэффициентов адаптивного фильтра на каждой итерации алгоритма. Параметры алгоритма следующие:  $\alpha = 0,45$ ,  $L = 256$ ,  $p = 0,0001$ , порог  $ERLE = 30$  дБ. При восприятии «на слух» также отчетливо слышна речь дальнего абонента в течение 1,2 секунды. Дальнейшую речь не слышно, однако в связи с тем, что подавление эхосигнала данным алгоритмом немного ниже,

чем алгоритмом НМНК-АЗКБ, то в те моменты, когда оно скачкообразно уменьшается, слышны обрывки фраз дальнего абонента

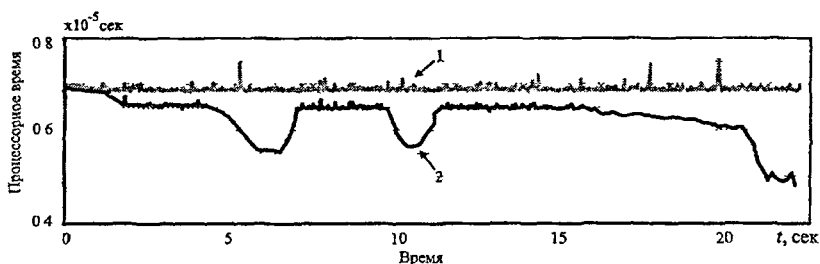


Рис 7 Процессорное время, затрачиваемое на подстройку весовых коэффициентов адаптивного фильтра 1 – алгоритм НМНК, 2 – алгоритм НМНК-АЗСБ

#### Результаты теста для алгоритма РНК-АЗКБ

На рис 8 изображены затраты процессорного времени для подстройки набора весовых коэффициентов адаптивного фильтра на каждой итерации алгоритма. Параметры алгоритма следующие  $\lambda = 0,45$ ,  $L = 256$ ,  $p = 0,05$ . При указанных параметрах эхокомпенсатор обеспечил подавление эхосигнала на 37 дБ относительно уровня  $y(n)$

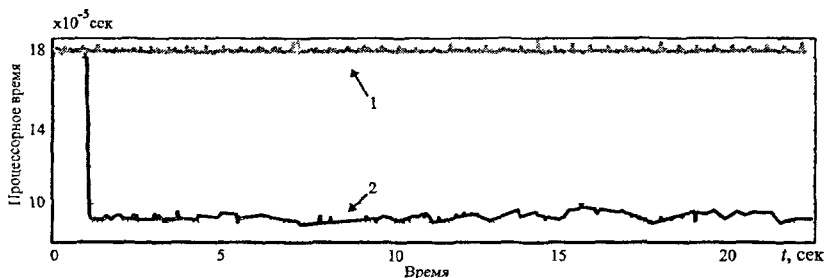


Рис 8 Процессорное время, затрачиваемое на подстройку весовых коэффициентов адаптивного фильтра 1 – алгоритм РНК, 2 – алгоритм РНК-АЗКБ

#### Результаты теста для алгоритма РНК-АЗСБ

Для алгоритма РНК-АЗСБ параметры имеют следующие значения  $\lambda = 0,99$ ,  $L = 256$ ,  $p = 0,0001$ . При указанных параметрах эхокомпенсатор также обеспечил подавление эхосигнала на 37 дБ относительно уровня  $y(n)$

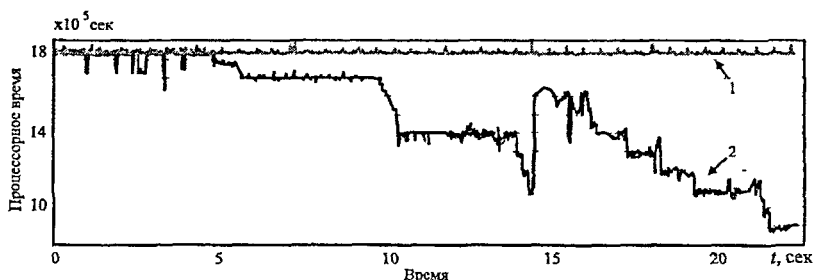


Рис 9 Процессорное время, затрачиваемое на подстройку весовых коэффициентов адаптивного фильтра 1 – алгоритм РНК, 2 – алгоритм РНК-АЗСБ

### Результаты теста для комбинированного алгоритма

На рис 10 приведены кривые процессорного времени для новых алгоритмов, основанных на РНК, и комбинированного алгоритма. Видно, что в начальном режиме, когда комбинированный алгоритм работает как РНК, нагрузка на процессор достаточно велика. Как только эхокомпенсатор достигает подавления эхосигнала в 30 дБ (в данном случае через 530 мс), происходит переключение с алгоритма РНК на алгоритм НМНК, что отчетливо видно из рисунка. Параметры алгоритма следующие:  $\alpha = 0,45$ ,  $\lambda = 0,99$ ,  $L = 256$ ,  $p = 0,05$ ,  $l = 16$ , порог переключения алгоритмов  $ERLE = 30$  дБ. При указанных параметрах эхокомпенсатор обеспечил подавление эхосигнала на 40 дБ относительно уровня  $y(n)$ .

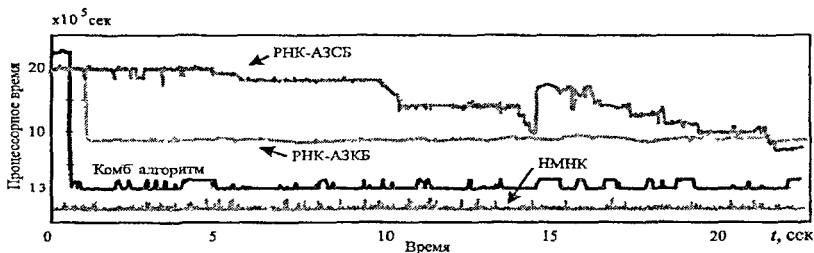


Рис 10 Сравнение процессорного времени, затрачиваемого на подстройку весовых коэффициентов адаптивного фильтра для гибридного алгоритма

Так как комбинированный алгоритм обладает скоростью сходимости, характерной для алгоритма РНК, то значительное подавление было достигнуто всего за 0,75 секунды. Из фразы дальнего абонента слышно лишь первое слово. Остальная часть фразы не слышна. В момент переключения с алгоритма РНК на алгоритм НМНК также никаких эффектов не проявилось.

Таким образом, в результате проведенных тестов новых алгоритмов на реальном речевом сигнале получены следующие результаты:

- все алгоритмы, построенные с применением процедуры понижения вычислительной нагрузки в режиме установившихся значений, показывают снижение требований к ресурсам процессора,
- алгоритмы на основе критерия АЗСБ уступают по степени подавления реального речевого сигнала и требованиям к ресурсам процессора по сравнению с алгоритмами на основе критерия АЗКБ,

- при работе новых алгоритмов, основанных на РНК, в остаточном экосигнале наблюдаются искажения в виде резких звуков и щелчков, что связано с высокой скоростью сходимости алгоритма РНК,
- комбинированный алгоритм показал значительное уменьшение вычислительной нагрузки по сравнению с другими алгоритмами, при этом подавление составило 40 дБ относительно неподавленного экосигнала

Исследование влияния конечной точности представления операндов на работу новых алгоритмов показало, что для алгоритмов, основанных на алгоритме РНК, точность представления операндов алгоритма является особенно значимой. При моделировании стабильность нового алгоритма, основанного на алгоритме РНК, достигалась при использовании 64 бит для представления значений матрицы  $W(n)$  и вектора  $k(n)$ . Основные отличия от результатов, полученных при 64-битном представлении операндов, заключаются в меньшем ослаблении экосигнала и уменьшении точности определения ИХ экотракта (аналогичные результаты при уменьшении разрядности операндов наблюдаются и для обычного РНК). Полученное значение  $ERLE \approx 50$  дБ показывает, что в данных условиях ослабление экосигнала, выполняемое алгоритмом, приближается к максимально возможному  $ERLE = 57$  дБ. Кроме того, следует отметить, что изменение точности коэффициентов не оказывает негативного влияния на скорость сходимости. Влияние конечной точности представления операндов на новые алгоритмы, основанные на алгоритме НМНК, сказывается в меньшей степени. Для удовлетворения рекомендации G 165 16-битного представления коэффициентов адаптивного фильтра достаточно. Для комбинированного алгоритма точность представления операндов важна в начальном режиме, когда подстройка весовых коэффициентов выполняется согласно выражениям для алгоритма РНК. В данном случае необходимо 64-битное представление операндов, особенно для процедуры подстройки коэффициентов адаптивного фильтра. Снижение точности до 32 бит приводит к ухудшению подавления экосигнала, значение  $ERLE$  не превышает 25 дБ в случае, когда на входе эхокомпенсатора действует реальный речевой сигнал.

#### *Построение многоканального эхокомпенсатора с применением процедуры понижения вычислительной нагрузки*

Сравним результаты работы новых адаптивных алгоритмов в составе одно-, трех- и пятиканального эхокомпенсаторов. Для подстройки весовых коэффициентов использовались алгоритмы НМНК-АЗКБ и РНК-АЗКБ. Предполагается, что экотракты имеют длительность ИХ  $L = 256$ . Параметры адаптивного алгоритма следующие:  $\alpha = 0,5$ ,  $\lambda = 0,99$ ,  $L = 256$ ,  $p = 0,05$ , порог  $ERLE = 10$  дБ. Уровни входных сигналов для каналов  $x_1(n) = -10$  дБм0,  $x_2(n) = -20$  дБм0,  $x_3(n) = -30$  дБм0,  $x_4(n) = -10$  дБм0,  $x_5(n) = -20$  дБм0. Величина подавления экосигнала, равная 50 дБ, достигалась алгоритмом за 200 мс. Максимальное подавление составило 85 дБ. После перехода адаптивного алгоритма в режим установившихся значений активными оставались только 32 из 256 весовых коэффициентов адаптивного фильтра для одноканального, 32 из 96 для трехканального, 32 из 768 для пятиканального эхокомпенсатора. Если предполагается, что все экотракты, которые может дополнительно обработать эхокомпенсатор, имеют одинаковую длительность ИХ, то применение одноканального устройства будет неоправданно, так как освобожденные ресурсы нельзя использовать для обработки дополнительных каналов. В случае трех каналов освобожденные ресурсы позволяют дополнительно подключить два канала длительностью импульсной характеристики 256 отсчетов. В пятиканальном варианте освобождаются ресурсы еще для четырех каналов. Следовательно, преимущество от применения новых алгоритмов будет ощутимо при реализации их в составе эхокомпенсатора, обрабатывающего два и более каналов. На рис 11 и рис 12 показаны процессорного времени при обработке 1 секунды

речевого сигнала от количества каналов для новых алгоритмов и алгоритмов НМНК и РНК соответственно

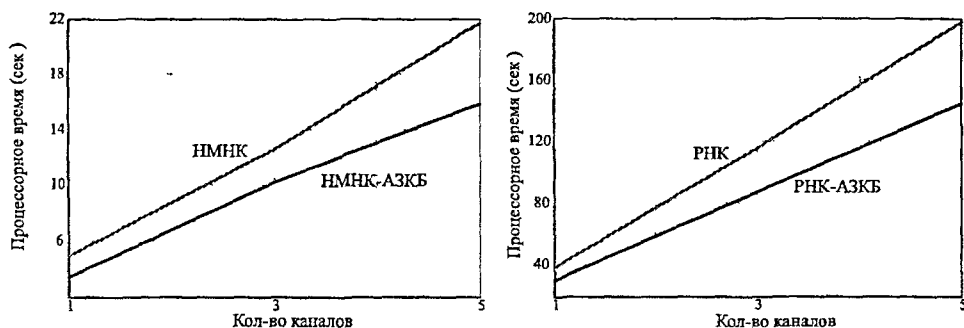


Рис 11 Затраты процессорного времени в зависимости от количества каналов

Зависимости получены при исследовании работы эхокомпенсатора в системе Matlab с использованием функции профайлинга. При указанных параметрах применение нового адаптивного алгоритма позволило снизить вычислительную нагрузку на 30% по сравнению с эхокомпенсатором на основе алгоритма НМНК или алгоритма РНК

Таким образом, по результатам теста можно заключить, что применение новой процедуры понижения вычислительной нагрузки адаптивных алгоритмов при построении многоканального эхокомпенсатора позволяет не только снизить требования алгоритма к вычислительной мощности процессора, но и использовать освободившиеся ресурсы для обработки дополнительных каналов

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации заключаются в следующем

- 1 Проведен анализ известных методов, основанных на блочном подходе к обработке эхосигнала и применяемых для понижения вычислительной сложности существующих адаптивных алгоритмов. Основными недостатками существующих методов являются их низкая скорость сходимости по сравнению с классическими алгоритмами и невысокая длительность импульсной характеристики обрабатываемых эхотрактов
- 2 Разработана процедура снижения вычислительной нагрузки адаптивных алгоритмов НМНК и РНК, основанная на разбиении набора весовых коэффициентов адаптивного фильтра на блоки с дальнейшим анализом импульсной характеристики эхотракта. Предложены два новых критерия оценки значимости блоков весовых коэффициентов: критерий, основанный на анализе значений весовых коэффициентов в блоках, и критерий, основанный на анализе значений сигнала отдельных блоков весовых коэффициентов
- 3 На основе разработанной процедуры проведена модификация существующих адаптивных алгоритмов НМНК и РНК с целью понижения вычислительной нагрузки. Предложенные алгоритмы функционируют в двух режимах: начальном и режиме установившихся значений. В начальном режиме новые алгоритмы работают по схеме классического НМНК или РНК. В режиме установившихся значений новые алгоритмы показывают значительное сокращение числа арифметических операций, выполняемых адаптивным алгоритмом. Комбинирование указанных режимов позволило создать новый адаптивный алгоритм, обладающий высокой скоростью сходимости РНК, устойчивостью и простотой реализации НМНК

- 4 Разработанные алгоритмы позволяют более точно моделировать эхотракты, компенсировать разность в длительностях ИХ адаптивного фильтра и эхотракта, тем самым снижая вычислительную нагрузку адаптивного алгоритма, обеспечивают заданный в тестах уровень подавления эхосигнала при наличии ненулевых отсчетов в нулевой части ИХ эхотракта. При использовании разработанных алгоритмов длительность ИХ обрабатываемых эхотрактов по сравнению с известными решениями увеличивается на 768 отсчетов и составляет 1280 (160 мс) в случае применения НМНК. Применение РНК-алгоритма позволяет обрабатывать эхотракты с длительностью ИХ до 2880 отсчетов (360 мс).
- 5 Получены результаты работы новых алгоритмов на реальном речевом сигнале. Определено подавление эхосигнала и уменьшение вычислительной нагрузки по сравнению с классическими алгоритмами. Исследована работа полученных алгоритмов при уменьшении разрядности операндов. Определено, что разрядность отдельных операндов, требуемых для устойчивой работы НМНК – 16 бит, для РНК – 64 бита.
- 6 Проведен анализ работы новых алгоритмов в составе многоканального эхокомпенсатора. Результаты теста эхокомпенсатора на основе новых алгоритмов показали, что их применение позволяет понизить вычислительную нагрузку на 30% по сравнению с обычным нормализованным методом наименьших квадратов и рекурсивным методом наименьших квадратов.

Разработанные процедура понижения вычислительной нагрузки и адаптивные алгоритмы на ее основе могут быть использованы при построении новых и модернизации существующих эхокомпенсаторов как электрического, так и акустического эха.

#### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

- 1 Тараканов, А. Н. Динамическое изменение числа перестраиваемых весовых коэффициентов адаптивного фильтра в задаче эхокомпенсации / А. Н. Тараканов, А. Л. Мосеев, С. В. Ульдинович // Телекоммуникации -2005 -№10 -С 12-18
- 2 Тараканов, А. Н. Комбинированный адаптивный алгоритм эхокомпенсации с пониженной вычислительной сложностью / А. Н. Тараканов, А. Л. Мосеев, С. В. Ульдинович // Цифровая обработка сигналов -2006 -№3 -С 26-30
- 3 Тараканов, А. Н. Изменение параметра  $\mu$  в процессе работы адаптивного алгоритма / А. Н. Тараканов, А. Л. Мосеев // Сб науч труд молодых ученых, аспирантов и студентов / -ЯрГУ -Ярославль, 2001 -С 91-94
- 4 Тараканов, А. Н. Применение цифровых адаптивных фильтров для подавления эха в каналах передачи информации / А. Н. Тараканов, А. Л. Мосеев, А. Е. Назаровский // Тез. III област. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых вузов «Ярославский край. Наше общество в третьем тысячелетии» -Ярославль, 2002 -С 14-15
- 5 Тараканов, А. Н. Изменяемый параметр  $\mu$  в адаптивном методе наименьших квадратов / А. Н. Тараканов, А. Л. Мосеев // Докл. 4-ой междунар. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» -М., 2002 -Т. 2, -С 110-112
- 6 Тараканов, А. Н. Реализация алгоритмов эхокомпенсации на цифровом сигнальном процессоре TMS320F243 / А. Н. Тараканов, А. Л. Мосеев, А. Е. Назаровский // Матер. науч.-тех. семинара «Синхронизация, формирование и обработка сигналов» -Ярославль, 2003 -С 94-96
- 7 Тараканов, А. Н. Уменьшение влияния одновременного разговора абонентов на работу эхокомпенсатора / А. Н. Тараканов, А. Л. Мосеев // Матер. науч.-тех. семинара

- «Синхронизация, формирование и обработка сигналов» -Ярославль, 2003 -С 116-119
- 8 Тараканов, А Н Робастификация адаптивного алгоритма в задаче эхокомпенсации / А Н Тараканов, А Л Мосеев // Докл 5-ой межд. конф и выст «Цифровая обработка сигналов и ее применение» -М, 2003 -Т 2, -С 399-402
  - 9 Тараканов, А Н Понижение чувствительности адаптивного алгоритма в задаче эхокомпенсации / А Н Тараканов, А Л Мосеев, А Е Назаровский // Тр 58-й науч сессии, посвященной Дню радио -М, 2003 -Т 1, -С 90-92
  - 10 Назаровский, А Е Моделирование работы робастного алгоритма эхокомпенсации на цифровом сигнальном процессоре ADSP-21160 / А Е Назаровский, А Н Тараканов, А Л Мосеев // Докл 6-ой межд конф и выст «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2004 -Т 1, -С 286-289
  11. Tarakanov, A N Improvement of NLMS adaptive algorithm performance in double talk mode / A N Tarakanov, A E Nazarovsky, A.L Moseev // Proc of 2nd IEEE Int Conf on Circuits and Systems for Communications Moscow, Russia, 2004
  - 12 Тараканов, А Н Модификация рекурсивного алгоритма наименьших квадратов / А Н Тараканов, А Н Назаровский, А Л Мосеев // Материалы V Всерос науч -практ конф «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» -Чебоксары, 2004 -С 181-182
  - 13 Тараканов, А Н Адаптивный алгоритм эхокомпенсации с изменяемым числом перестраиваемых коэффициентов / А Н Тараканов, А Л Мосеев // Докл 7-й межд конф и выст «Цифровая обработка сигналов и ее применение» -М, 2005 -Т 1, -С 164-167
  - 14 Тараканов, А Н Адаптивный фильтр с изменяемым числом перестраиваемых коэффициентов, как основа многоканального эхокомпенсатора / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Тр 60-й науч сессии, посвященной Дню радио -М, 2005 -Т 1, -С 311-313
  - 15 Тараканов, А Н Снижение вычислительной сложности адаптивных алгоритмов эхокомпенсации / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Матер науч -тех семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания» -Самара, 2005 -С 115-119
  - 16 Тараканов, А Н Динамически конфигурируемый адаптивный фильтр в задаче эхокомпенсации / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Тр Междунар науч-тех конф «Информационные средства и технологии» -М, 2005 -Т 1, -С. 107-111
  - 17 Тараканов, А Н Уменьшение вычислительной сложности нормализованного метода наименьших квадратов / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Матер 6-й Всероссийской науч-тех конф «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» -Чебоксары, 2005 -С 176-179
  - 18 Тараканов, А Н Понижение вычислительной сложности адаптивных алгоритмов эхокомпенсации / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Докл 8-й Междунар конф и выст «Цифровая обработка сигналов и ее применение» -М, 2006 -Т 1, -С 265-268
  - 19 Тараканов, А Н Адаптивные алгоритмы с пониженной вычислительной сложностью / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Сб докл юбил науч -техн конф «Инновации в радиотехнических, информационно-телекоммуникационных технологиях» -М, 2006 -С 246-255

- 20 Тараканов, А Н Рекурсивный метод наименьших квадратов с пониженной вычислительной сложностью / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Физический вестник Ярославского гос унив им П Г Демидова сб науч тр / ЯрГУ. -Ярославль, 2006 -Вып 1 -С 329-336
- 21 Тараканов, А Н Разработка адаптивного алгоритма эхокомпенсации с целью понижения его вычислительной сложности / А Н Тараканов, А Л Мосеев, С В Ульдинович // Докл 12-й Междунар науч-техн конф студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» / МЭИ -М, 2006 -Т 1, -С 19-21
- 22 Мосеев, А Л Понижение вычислительной сложности рекурсивного метода наименьших квадратов / А Л Мосеев, А Н Тараканов, С В Ульдинович // Тр 61-й науч сессии, посвященной Дню радио -М, 2006 -Т 1, -С 103-105
- 23 Мосеев, А Л Разработка адаптивного алгоритма эхокомпенсации с целью понижения его вычислительной сложности / А Л Мосеев, С В Ульдинович, А Е Назаровский // Тез докл 12-й Междунар науч-техн конф студентов и аспирантов / МЭИ -М, 2006 -Т 1, -С 19-21
- 24 Tarakanov, A N Reducing of computation complexity in adaptive algorithm for echo cancellation / A N Tarakanov, A L Moseev, S V Uldinovich // Proc of the XI Symposium AES «New trends in audio and video» Bialystok, Poland, 2006 -P 263-267

Подписано в печать 26 04 07  
 Формат 60<sup>7</sup>84 1/16 Усл печ л 1,5 Тираж 100 экз

Отпечатано на ризографе  
 Ярославский государственный университет  
 150000 Ярославль, ул Советская, 14